



Centro Politécnico Superior
Universidad de Zaragoza



PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS DE LOS PROCEDIMIENTOS DE MANTENIMIENTO INVERNAL DE LA RED VIARIA

Autor:

Jorge Arenillas Gay

Ingeniería Industrial
Mención Organización Industrial

Director:

Dr. Manbir Sodhi

*Mechanical, Industrial and Systems
Engineering*

The University of Rhode Island



Ponente:

Ana Clara Pastor Tejedor

*Dpto. de Organización y Dirección de
Empresas*

Universidad de Zaragoza



Junio 2011



1. AGRADECIMIENTOS

Antes de comenzar con el proyecto en sí, me gustaría agradecer a todos aquellos profesores que durante mi etapa como estudiante de la universidad de Zaragoza han tratado siempre de dar lo mejor de sí mismos, dotándome con su esfuerzo de aquellos conocimientos que han considerado fundamentales tanto para mi formación académica como para mi superación personal.

Por otra parte, considero necesario agradecer el esfuerzo realizado por todos los responsables del departamento de relaciones internacionales, tanto de la universidad de Zaragoza como de la universidad de Rhode Island, que han hecho posible la realización de este proyecto bajo el marco de movilidad internacional.

Agradecer profundamente a Ana Clara Pastor, ponente de este proyecto, por la ayuda que me ha dado en todo momento para hacer la coordinación del mismo mucho más sencilla y, por último, pero no por ello menos importante, agradecer al Dr. Manbir Sodhi, director del proyecto, tanto su esfuerzo personal que a nivel académico me ha dado durante toda mi estancia en su departamento, como también el trato que me ha ofrecido, haciéndome que me sintiera como uno más de su familia desde el mismo momento de mi llegada a los Estados Unidos, respaldándome en todas las decisiones que he tenido que tomar y convirtiéndose de esta manera en algo más que un profesor para mí.

Para finalizar, agradecer especialmente a Carlos, Conchi y Marcos, mi familia, por todo el apoyo que me han dado durante todos estos duros años de estudio y esfuerzo. Sin su apoyo y comprensión, no me cabe ninguna duda de que todo esto me hubiera sido simplemente imposible de conseguir.

Jorge Arenillas Gay



Análisis de los procedimientos de mantenimiento invernal de la red viaria

RESUMEN

Puesto que hoy en día la sociedad requiere de una red viaria que ofrezca unas condiciones aceptables en todo momento para poder realizar las actividades diarias que en ella deben desenvolverse, junto con el hecho de que las operaciones de mantenimiento a llevar a cabo en las mismas acarrear anualmente unos enormes gastos económicos, tanto de forma directa como indirecta a las arcas privadas y gubernamentales, hace que sea más que necesario que dichas operaciones a realizar sean estudiadas en profundidad y optimizadas en la medida de lo posible con el propósito de reducir dichos costos y, al mismo tiempo, mejorar la satisfacción de la sociedad al respecto.

Generalmente, en lugares con malas condiciones climáticas en la temporada invernal, las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria adquieren un papel mucho más importante que el resto de operaciones de mantenimiento ya que una incorrecta planificación de las mismas suele acarrear enormes problemas de funcionalidad, como imposibilidad de acceder a determinados lugares, o incluso la necesidad de suspender varias de las actividades básicas diarias.

Por estos motivos, y a sabiendas de que dentro de las operaciones de mantenimiento invernal, uno de los factores clave en su planificación es el diseño de las rutas que los vehículos implicados en la realización de dichas operaciones, el objetivo de este proyecto consiste en diseñar la ruta más conveniente para cada una de las principales operaciones de mantenimiento invernal, es decir, el esparcimiento de sal y abrasivos, la retirada de la nieve, y la carga y depósito de la misma. A fin de alcanzar dicho objetivo, se desarrolla a lo largo del proyecto un programa que permite calcular de forma detallada dichas rutas.

En primer lugar, dada la gran complejidad del problema a tratar, ha sido necesario estudiar detalladamente las características y dificultades que este presenta, para lo cual, además de realizar un estudio detallado de los bibliografía existente del tema en cuestión, se han mantenido entrevistas periódicas con el encargado del departamento del mantenimiento de la red viaria en la universidad de Rhode Island, lugar en el cual ha sido desarrollado el presente proyecto durante una estancia de 9 meses. El hecho de desarrollar dicho estudio en el área de New England, donde existen unas duras condiciones climáticas en la época invernal, ha ayudado enormemente a comprender la importancia del problema en cuestión y sus características, además de facilitar el proceso para una futura implementación real del mismo ya que, puesto que la propia universidad de Rhode Island es una de las mayores interesadas en los resultados obtenidos, se ha optado por ejecutar en todo momento las pruebas necesarias sobre un grafo representativo del propio campus de la universidad a fin de que el análisis de los resultados obtenidos simulara fielmente el problema real.

Durante el desarrollo del algoritmo, se han desarrollado diferentes versiones del mismo, generalmente añadiendo a cada paso nuevas restricciones que hicieran el problema más semejante a la realidad. En cada una de estas versiones del programa, se han ido analizando las soluciones obtenidas y, de ésta forma, se ha valorado si dichas modificaciones deben ser mantenidas o descartadas hasta dar con un programa genérico definitivo. Este programa podrá ser aplicado sobre cualquier conjunto viario que sea motivo de estudio, consiguiendo de esta forma optimizar las operaciones de mantenimiento invernal en dicho lugar, lo cual conllevará ahorros significativos a las instituciones encargadas de realizar dichas operaciones que opten por usar esta herramienta.



TABLA DE CONTENIDO

1. AGRADECIMIENTOS.....	- 2 -
2. INTRODUCCIÓN.....	- 6 -
2.1. JUSTIFICACIÓN.....	- 6 -
2.2. OBJETIVO Y ALCANCE	- 6 -
2.3. CONTEXTO	- 6 -
2.4. ESTUDIOS PREVIOS	- 6 -
2.5. HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS UTILIZADAS	- 7 -
2.6. METODOLOGÍA.....	- 7 -
2.7. CONCLUSIONES.....	- 8 -
2.8. CONTENIDO DE LA MEMORIA	- 8 -
3. PUNTOS CLAVE EN EL MANTENIMIENTO INVERNAL DE LA RED VIARIA.....	- 10 -
3.1. PRINCIPALES OPERACIONES EN EL MANTENIMIENTO INVERNAL DE LA RED VIARIA.....	- 11 -
3.2. GESTIÓN DE LOS PROBLEMAS DE ORGANIZACIÓN OPERACIONALES	- 14 -
3.2.1. Nivel de servicio	- 14 -
3.2.2. Localización de los almacenes de vehículos y de materiales para las operaciones de esparcimiento de químicos y abrasivos.....	- 14 -
3.2.3. Localización de los lugares de depósito de la nieve extraída	- 15 -
3.2.4. Diseño de los sectores de operación.....	- 15 -
3.2.5. Asignación de sectores a los lugares de depósito.....	- 16 -
3.2.6. Organización de la flota de vehículos y equipos.....	- 17 -
3.2.7. Ruteo de los vehículos.....	- 17 -
4. CONCLUSIONES	- 19 -
4.1. APORTACIONES DEL TRABAJO REALIZADO	- 19 -
4.2. CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	- 19 -
4.3. POSIBILIDADES DE AMPLIACION Y MEJORA.....	- 20 -
4.4. INCIDENCIAS Y PROBLEMAS ENCONTRADOS	- 21 -
4.5. OPINIÓN PERSONAL Y EXPERIENCIA ADQUIRIDA	- 22 -
5. BIBLIOGRAFÍA	- 23 -



6. ANEXOS	- 25 -
6.1 CONTENIDO DE LOS ANEXOS	- 25 -
6.2. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN BASADOS EN COLONIAS DE HORMIGAS (ACO)	- 26 -
6.3. DESARROLLO DEL ALGORITMO	- 33 -
6.3.1. Base de trabajo del algoritmo	- 33 -
6.3.2. Bases de desarrollo del algoritmo	- 36 -
6.3.3. Construcción del algoritmo	- 36 -
6.4. PROGRAMA DEFINITIVO.....	- 62 -



2. INTRODUCCIÓN

2.1. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, la alta dependencia de la sociedad con la red viaria para realizar sus tareas diarias hace que el diseño de las operaciones de mantenimiento a realizar en las mismas adquiera un papel vital. En especial, en aquellos lugares en los cuales las condiciones climáticas invernales no son favorables, generalmente en localizaciones con fuertes y regulares tormentas de nieve, el estado de la red viaria todavía cobra mayor importancia en dichas fechas.

Los enormes gastos económicos que dichas operaciones invernales conllevan anualmente, tanto de forma directa como indirecta, hacen que las más ligeras mejoras en cuanto a la planificación u organización de las mismas supongan unos ahorros más que significativos tanto en las arcas gubernamentales como privadas. Por otra parte, con dichas mejoras en las operaciones invernales, se consigue que las zonas afectadas no reduzcan su productividad de una manera tan notoria.

2.2. OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo principal de éste proyecto es diseñar la ruta más conveniente de los vehículos implicados en la realización de las operaciones de mantenimiento invernal de una determinada red viaria, para lo cual, se ha realizado un programa que permite calcular detalladamente dicha ruta basándose en los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas.

A fin de obtener información relevante, se han estudiado en primer lugar los factores más influyentes a tener en cuenta a la hora de planificar las principales operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria, es decir, el esparcimiento de sal y abrasivos, la retirada de la nieve, y la carga y depósito de la misma.

2.3. CONTEXTO

El estudio ha sido realizado en el departamento de 'Mechanical, Industrial and Systems Engineering' en la Universidad de Rhode Island durante una estancia de 9 meses. La importancia del tema a tratar en dicha zona, debido a las duras condiciones climáticas en el área de New England, hacen de dicho lugar, la localización ideal para llevar a cabo un estudio de éstas características así como para su posterior aplicación.

2.4. ESTUDIOS PREVIOS

A pesar de la existencia de varios estudios previos relacionados con el proceso de selección de las rutas a seguir por los vehículos en el mantenimiento invernal en las redes viarias, ninguno de ellos ha implementado algoritmos meta-heurísticos que tengan sus bases en los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas, los cuales fueron introducidos por Dorigo y Stützle en el libro Ant Colony Optimization (Dorigo & Stützle., 2004). Sin embargo, varios de estos estudios han servido para extraer conclusiones muy valiosas en el proceso de creación del programa desarrollado.

De entre los estudios previos más notorios cabe destacar, por ejemplo, el realizado por Cook y Alprin, (Cook & Alprin, 1976), cuyo objetivo era conseguir repartir proporcionadamente la carga de trabajo entre los diferentes vehículos implicados en las operaciones de esparcimientos de sal, para lo cual presentaron un método heurístico que minimizaba el tiempo que se tardaba en cubrir todas las calles de una determinada red viaria. Otro estudio a nombrar es el desarrollado por Lemieux y Campagna, (Lemieux & Campagna, 1984), ya que



implementaron un algoritmo basado en heurística que trazaba un circuito de Euler en un grafo dirigido teniendo en cuenta las relaciones de precedencia para el problema de retirada de nieve en entornos rurales. Posteriormente, Eglese (Eglese, 1994) desarrolló un estudio que permitía la existencia de múltiples depósitos, añadía el parámetro de la capacidad máxima de cada vehículo y consideraba diversas prioridades de limpieza de carreteras, con el objetivo final de minimizar la distancia que los camiones encargados de transportar abrasivos debían realizar.

2.5. HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS UTILIZADAS

Para la realización del programa, se ha optado por la utilización de Python como lenguaje de programación. Dicha decisión se debe a las múltiples ventajas que éste ofrece, además del hecho de no tener coste alguno. En primer lugar, se trata de un lenguaje de muy alto nivel, rápido de programar y compacto ya que, por ejemplo, un programa en Python suele ser bastante más corto que su equivalente en lenguajes como C y, por otra parte, con Python el código se hace más limpio, legible y fácil de entender que con otros lenguajes. Además, dispone de una enorme cantidad de funciones y librerías, lo cual resulta muy útil en el proceso de programación.

A pesar de la alta velocidad de ejecución de los programas desarrollados bajo Python, la enorme densidad de datos a obtener en cada una de las rutas diseñadas por el programa, así como la cantidad de información a actualizar en cada iteración hacen necesario el uso de un ordenador de 2 núcleos con el propósito de acelerar el proceso. Por este motivo, los programas han sido ejecutados bajo un ordenador modelo DELL Precision T7500 de 2 núcleos a 2,13 GHz cada uno y una memoria RAM de 12GB, propiedad del departamento de 'Mechanical, Industrial, and Systems Engineering' en la universidad de Rhode Island.

Para el estudio y análisis de los datos obtenidos, ejecución de estadísticas y gráficos representativos de las distintas iteraciones del programa, Microsoft Office Excel 2010 ha sido el programa utilizado.

2.6. METODOLOGÍA

En primer lugar, dada la gran complejidad del problema a tratar, ha sido necesario estudiar detalladamente las características y dificultades que este presenta. Durante esta fase, además de realizar una profunda revisión bibliográfica acerca del tema, la cual ya ha sido nombrada anteriormente, se mantuvieron una serie de reuniones con el director del departamento de 'Facilities Services', el cual se encarga del mantenimiento de la red viaria en la universidad de Rhode Island.

Una vez conocido y analizado el problema en profundidad, se ha disgregado el mismo en varios problemas de menor entidad con el propósito de que este pudiera ser implementado más sencillamente en un algoritmo que resultara eficaz y útil para las diferentes instituciones u organismos interesados en solucionar el problema de ruteo de las máquinas quitanieves. Puesto que una de las instituciones más interesadas en los resultados obtenidos de dicha investigación es la propia universidad de Rhode Island, se ha simulado en un grafo la red viaria del campus con el propósito de que el conjunto de pruebas realizadas sean aplicadas en un entorno lo más real posible.

Durante el proceso de desarrollo del algoritmo, se han desarrollado diferentes versiones del mismo, las cuales vienen descritas en el apartado 6.3.3. Construcción del algoritmo, generalmente añadiendo a cada paso nuevas restricciones que hicieran el problema más semejante a la realidad y, con ello, también más complejo. En cada una de estas versiones del programa, se han ido analizando las soluciones obtenidas y, de ésta forma, se ha valorado si dichas modificaciones añadidas con respecto a la versión anterior actúan positivamente o negativamente en el resultado final del programa y, por tanto, manteniendo o descartando dichas



modificaciones respectivamente.

Por estos motivos, se puede considerar la metodología de trabajo como práctica y aplicada, ya que, el desarrollo del algoritmo ha estado guiado en todo momento por los resultados ofrecidos por las distintas modificaciones del mismo al ser aplicado sobre el grafo de la universidad de Rhode Island, por lo que todas y cada una de las decisiones tomadas es justificada en base a resultados totalmente extrapolables a la realidad.

2.7. CONCLUSIONES

Tras la aplicación de cada una de las diferentes modificaciones del programa al grafo que simula el campus de la universidad de Rhode Island y el posterior análisis de los resultados obtenidos, será posible concretar cuál es la versión más apropiada del programa, es decir, cual es la que ofrece una mejor calidad de resultados así como una mayor similitud con la realidad.

Una vez ya se dispone del programa definitivo, este podrá ser aplicado sobre el conjunto viario que sea motivo de estudio a fin de conseguir una planificación idónea de las operaciones de mantenimiento invernal de dicha red viaria. Puesto que el programa en cuestión se trata de un programa genérico, para la aplicación del mismo sobre diversos conjuntos viarios bastara con que se realice un grafo simulando dicho conjunto viario.

Con los resultados que hayan sido obtenidos de la aplicación del programa, podrá analizarse en cada caso particular cuales son los ahorros tanto en cuestión de tiempo como económicos por parte de las instituciones que decidan usar dicha herramienta debido a la optimización de dichos procesos de ruteo de los vehículos implicados en las operaciones de mantenimiento invernal.

2.8. CONTENIDO DE LA MEMORIA

3. Puntos clave en el mantenimiento invernal de la red viaria

En primer lugar, como introducción a dicho apartado, se realiza un estudio de los costes más relevantes de las principales operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria, es decir, el esparcimiento de productos químicos y abrasivos, la retirada de nieve, la carga de la misma en camiones y el transporte de ésta hasta los lugares de depósito, para de esta forma, comprender de la importancia del problema.

Posteriormente, con el propósito de vislumbrar las características específicas de cada una de estas operaciones y, con ello, concebir la enorme dificultad que conlleva la realización de dichas actividades año tras año por las instituciones encargadas de su planificación, se realiza un estudio en profundidad de estas dentro del sub-apartado '3.1. Principales operaciones en el mantenimiento invernal de la red viaria'.

Como último punto a estudiar en este apartado, se realiza una descripción detallada de los diferentes factores a estudiar en el proceso de decisión. Entre ellos se consideran los niveles de servicio a aplicar en los diversos tramos de carreteras, la localización de los almacenes tanto de vehículos como de materiales, la localización de lugares para el depósito de la nieve, el diseño de los sectores en los cuales dividir la red de transporte, la asignación de dichos sectores a los diferentes lugares determinados para el depósito de nieve, las diferentes posibilidades en cuanto a la flota de vehículos y las rutas de dichos vehículos a la hora de realizar las operaciones de mantenimiento. Dicha descripción se lleva a cabo en el apartado '3.2. Gestión de los problemas de organización operacionales'.



4. Conclusiones

Como último apartado de la memoria, se analiza la utilidad del programa desarrollado así como sus posibles mejoras y las futuras implementaciones que pudiera tener de un modo detallado.



3. PUNTOS CLAVE EN EL MANTENIMIENTO INVERNAL DE LA RED VIARIA

Las principales operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria son el esparcimiento de productos químicos y abrasivos, la retirada de nieve, la carga de la misma en camiones y el transporte de ésta hasta los lugares de depósito. Estas operaciones comprenden un conjunto de problemas de decisión u organización en cuatro diferentes niveles, estratégico, táctico, operacional y tiempo real.

En general, ésta serie de problemas son realmente complejos y además muy específicos la zona geográfica donde deban de ser resueltos. Esto se debe a las enormes diferencias en las condiciones de partida de cada uno de dichos problemas, como diferentes condiciones geográficas, meteorológicas, demográficas, económicas o incluso tecnológicas. Es por ello que las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria requieren de una enorme variedad de métodos de planificación así como de una amplia metodología de aplicación de los mismos. Es debido a éstos motivos que el encontrar una solución eficaz y general a los problemas de retirada de hielo y nieve no es algo sencillo de conseguir.

La importancia de un correcto planeamiento de las operaciones de mantenimiento invernal en redes viarias se debe a la enorme magnitud de los gastos necesarios para que éstas sean desarrolladas, lo cual, como se indica en (Minsk, 1998), cuesta a la mayoría de los gobiernos estatales del norte de los Estados Unidos una cifra estimada de 2 billones de dólares cada año, y, tal y como se apunta en (National Research Council (U.S.), 1995), éstos gastos pueden ser cerca de dos o tres veces superiores en Japón o Europa. Además de éstos gastos directos, los costes indirectos como la pérdida de productividad debido a el decremento de la movilidad, los efectos de químicos y abrasivos en infraestructuras, vehículos y en el medio ambiente, así como la degradación de la calidad del agua a consecuencia de ello, se estiman como más de 5 billones de dólares al año en los Estados Unidos (National Research Council (U.S.), 1995).

Otros costes indirectos deben ser también considerados a pesar de que en ocasiones puedan ser más difíciles de cuantificar económicamente como los costes debidos accidentes, retrasos o pérdidas en la producción. Es importante remarcar que los costes más notorios en el mantenimiento invernal de la red viaria son aquellos directamente relacionados con la aplicación de las operaciones necesarias para que dicho mantenimiento sea realizado, es decir, los costes directos.

En la Tabla 1 se muestran los costes fijos y variables más importantes para cada una de las principales operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria.

Costes	Operaciones		
	Esparcimiento	Retirada	Carga y transporte
Variables	Costes de carburantes	Costes de carburantes	Costes de carburantes
	Costes de tripulación	Costes de tripulación	Costes de tripulación
	Mantenimiento de vehículos	Mantenimiento de vehículos	Mantenimiento de vehículos
	Costes de material	Costes variables de los depósitos de vehículos	Costes variables de los depósitos de vehículos
	Costes variables de los depósitos de vehículos		Costes variables de los lugares de depósito
	Costes variables de los depósitos de material		



Fijos	Costes de los esparcidores	Costes fijos de operaciones de retirada	Costes fijos de operaciones de carga y transporte
	Costes fijos de los depósitos de vehículos	Equipamiento	Equipamiento
	Costes fijos de los depósitos de material	Costes fijos de los depósitos de vehículos	Costes fijos de los depósitos de vehículos
			Costes fijos de los lugares de depósito

Tabla 1: Costes operativos en el contexto del mantenimiento invernal de la red viaria

Una vez conocidos los principales costes para cada una de las operaciones de mantenimiento invernal, una manera muy útil de calcular el coste de mantenimiento para cada operación de mantenimiento y para cada tramo viario r es calculada en base a la Ecuación 1, en la cual N_r representa el número de pases necesario para dicho tramo, L_r la longitud del mismo, T_a es la frecuencia de la operación de mantenimiento durante un año y M_r es el coste de aprovisionamiento de personal y material que dicho tramo necesita para que una determinada operación sea llevada a cabo :

$$CM_r = N_r * L_r * T_a * M_r$$

Ecuación 1: Coste de mantenimiento del tramo r

Como último punto a comentar en cuanto a costes se refiere, es necesario señalar la importancia en la distribución de los mismos en el mantenimiento invernal de la red viaria ya que dichos costes pueden ser enormemente reducidos en caso de que vehículos, equipamiento y personal sean compartidos entre las diversas operaciones de mantenimiento invernal e incluso entre otras operaciones de mantenimiento no relacionadas con la temporada invernal.

3.1. PRINCIPALES OPERACIONES EN EL MANTENIMIENTO INVERNAL DE LA RED VIARIA

La aplicación real de las principales operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria implica resolver un conjunto de problemas de organización los cuales serán detallados más en profundidad en las siguientes secciones. Sin embargo, con el propósito de comprender más detalladamente la verdadera entidad y problemática de éstas operaciones y analizar las diferentes posibilidades de coordinación entre ellas, a continuación se desarrolla un estudio más detallado de cada una de éstas operaciones principales.

Las operaciones de esparcimiento de productos químicos y abrasivos son aplicadas cuando se considera necesario evitar el congelamiento, descongelar o bien aumentar la tracción de la red viaria. Sin embargo, en determinadas ocasiones, como en el caso de que las precipitaciones de nieve o hielo ocurran sobre pavimentos con temperaturas demasiado bajas para la aplicación de químicos ($<-11^{\circ}\text{C}$), o en el caso de poco volumen de nieve o hielo en redes no pavimentadas, es posible prescindir de las mismas y realizar directamente las operaciones de retirada de nieve. Generalmente, la nieve es retirada de las redes viarias mediante camiones con quitanieves acoplados en su parte delantera o en un lateral pero en otras ocasiones, la nieve es lanzada a un lado del camino mediante máquinas quitanieves rotatorias. Cuando la nieve y el hielo se encuentran compactados, es muy común el uso de quitanieves con cuchilla con el fin de que éste compacto sea cortado y troceado.

Al igual que las operaciones de carga y transporte de la nieve hasta los lugares de depósito, la operación de la retirada de la nieve también es considerada como un método mecánico ya que la nieve es recogida desde la carretera o camino, se trocea o corta si es necesario y se deposita a un lado de la carretera todo ello usando mecanismos físicos. A pesar de que éste es el método más común y económico de eliminar nieve y hielo de las



redes viarias, existen otros dos métodos que pueden ser aplicados, los métodos químicos y los térmicos. En cuanto a los primeros, éstos consisten en aplicar externamente o por dentro de la superficie, depresivos con un determinado punto de congelación. Por otra parte, los métodos térmicos consisten en la aplicación de calor bien en la superficie de la carretera o bien por debajo de la misma ya sea para prevenir el depósito de nieve y hielo o bien para su retirada.

Cuando el objetivo principal de las operaciones de esparcimiento es evitar el congelamiento, es decir, que se una nieve y hielo a la superficie de la carretera, se aplican depresivos químicos con un determinado punto de congelación. La idea básica de ésta operación es prevenir la formación de hielo en lugar de derretir el mismo una vez éste ya ha sido formado. Gracias a esta operación de anti-congelamiento, se consiguen dos objetivos fundamentales, una reducción considerable de las cantidades de químicos necesarios en comparación con los que se necesitarían en el caso de tener que descongelar y una mejor funcionalidad de las operaciones de retirada de nieve ya que será más sencillo la retirada de ésta al no estar congelada y adherida al pavimento. La manera más efectiva de llevar a dichas operaciones es esparcir los químicos de la forma más uniformemente posible a lo largo de la red viaria. Por ejemplo, las tasas de aplicación y de cobertura de dichos químicos son mucho mejores cuando se esparcen químicos líquidos que sólidos, consiguiendo de ésta forma una menor pérdida de material y una reducción considerable del tráfico de esparcidores. La decisión más importante a tomar cuando se planean las operaciones de esparcimiento con el objetivo de lograr evitar el congelamiento es decidir el momento de comienzo de las mismas. Para ello, es fundamental conocer tanto la temperatura superficial del pavimento y su tendencia, lo cual indicará la probabilidad de que nieve o hielo se congelen en la carretera, como la predicción meteorológica, lo cual indicará la probabilidad de precipitación y la forma más probable de la misma. Con el propósito de conseguir el mayor nivel de servicio posible durante y después de que una precipitación ocurra, es altamente recomendable coordinar dichas operaciones de anti-congelamiento con oportunas retiradas de nieve y hielo mediante quitanieves, es decir, combinar apropiadamente las operaciones de retirada con las de esparcimiento de químicos.

Las operaciones con el objetivo de descongelar consisten en esparcir químicos periódicamente para debilitar la ya producida unión de nieve y hielo con el pavimento hasta que ésta desaparece. Cuando esto ocurre, se producen láminas de hielo que deben de ser retiradas mediante máquinas quitanieves o bien, en caso de que dichas láminas no sean muy grandes, mediante el propio paso de tráfico a través de ellas. Tal y como se comentó anteriormente, dichas operaciones de descongelamiento requieren de mayores cantidades de químicos que las operaciones de anti-congelamiento. Esto es debido a que las partículas de químicos se diluyen al intentar alcanzar la unión hielo-pavimento ya que necesitan atravesar la capa superficial formada de nieve o hielo. Por otra parte, para acelerar las operaciones de descongelamiento y reducir tanto el rebote como el desparrame de los químicos sólidos es muy común pre-humedecerlos, técnica con la que además, se consigue mejorar la adhesión a la carretera de los mismos. A pesar de que la sal es el químico más comúnmente usado, debido a su bajo coste, su disponibilidad, su facilidad de aplicación y su gran capacidad para derretir hielo, los efectos negativos que produce en infraestructuras, vehículos, y medio ambiente hacen que se reduzca el uso de la misma en éste tipo de operaciones. Diversos ejemplos de éstas consecuencias negativas como el aceleramiento de la corrosión de metales en puentes, daños en estructuras de parking o en motores de vehículos, incremento de los niveles de sodio en el agua o daños en la vegetación colindante a las redes viarias son mostradas en (Minsk, 1998) y en (National Research Council (U.S.), 1995). Generalmente, las operaciones de retirada en coordinación con las correspondientes a descongelación tienen como objetivo controlar la cantidad de nieve o hielo que se va soltando de la superficie del pavimento al actuar los descongelantes.

Como último objetivo a nombrar en cuanto a las operaciones de esparcimiento se encuentra el mejorar la tracción de la red viaria en gruesos conjuntos de nieve empacada y en superficies congeladas. El método más



común para realizar dicha labor en superficies con temperaturas realmente bajas para un uso eficaz de químicos es esparcir materiales abrasivos como arena, carbonilla, ceniza, granza, piedra o roca aplastada y desmenuzada por sí solos. En algunas ocasiones, éstos abrasivos se mezclan con pequeñas cantidades de químicos con el objetivo de que éstos realicen al mismo tiempo su función de anti-congelantes o des-congelantes y además conseguir mantener de ésta forma los depósitos de abrasivos libres de congelaciones o aglomeraciones. La principal ventaja del uso de abrasivos es su bajo coste, sin embargo otras ventajas importantes a señalar son la inmediata tracción que éstos ofrecen en superficies resbaladizas y el hecho de que estos sean visibles hacen más sencilla la aplicación de los mismos por los equipos encargados de esparcir los mismos. El principal inconveniente de los abrasivos es el hecho de que se requiere recargar los camiones de manera mucho más frecuente que en el caso de usar productos químicos como la sal. Otros inconvenientes a destacar del uso de los mismos son los múltiples problemas que estos causan en desagües y canales al obstruir los mismos, junto con los enormes esfuerzos de limpieza necesarios tras finalizar una tormenta o la temporada invernal, o la polución resultante de las finas partículas que se transportan por el aire. Con el objetivo de mejorar los resultados de las operaciones de esparcimiento de abrasivos para incrementar la fricción de las redes viarias, éstas operaciones se desarrollan conjuntamente con las operaciones de retirada de nieve una vez éstas últimas ya han actuado, aunque en ciertas ocasiones podría todavía quedar una capa de nieve o hielo adherida al pavimento. El aplicar éstas dos operaciones conjuntamente puede ser realizado en la gran mayoría de los casos pero es especialmente recomendable en aquellos casos en los que las bajas temperaturas del pavimento impiden el uso de químicos, como ya se nombró anteriormente, o bien en carreteras con muy bajo volumen de tráfico. Además, ésta combinación de operaciones también es posible en carreteras no pavimentadas, siempre y cuando no existan o hayan muy pocos químicos en la mezcla del producto a esparcir.

Las restricciones económicas, las condiciones climáticas, el nivel de servicio aplicado a cada tramo, la disponibilidad de material o equipamiento, o las condiciones medio ambientales, las cuales influyen en la elección de una operación con químicos o sin ellos, hacen que la decisión de tomar un tipo u otro de operación de esparcimiento sea realmente complicada. Como ya se ha comentado anteriormente, en ciertas ocasiones, es recomendable el uso conjunto de las operaciones de recogida con las de esparcimiento. Sin embargo, a la hora de planear dicha coordinación es básico tener en cuenta que en el caso de las operaciones de recogida, éstas están limitadas a realizarse tan solo en un carril a la vez y, por el contrario, en las operaciones de esparcimiento, las máquinas esparcidoras pueden ser configuradas para cubrir al mismo tiempo ambos sentidos de circulación, con lo que solo se necesita una pasada en cada tramo. Tal y como se indica en (*A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV. Vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal, 2007*), las agencias encargadas de la retirada de nieve aplican diferentes patrones de retirada para redes viarias con dos carriles y autopistas multi-carril. Por ejemplo, muchas agencias retiran la nieve de la línea central en las carreteras de dos carriles o en la primera o en la segunda pasada, mientras que otras agencias lo hacen en todas las pasadas o tan a menudo como pueden sin interferir en el tráfico. Por otra parte, en el caso de las redes viarias multi-carril, en un gran número de ocasiones, los organismos encargados de dicha retirada de nieve desarrollan patrones de retirada conjuntos con formaciones de máquinas en escalón ya que, de ésta forma, una vía de éstas características puede ser limpiada con tan solo una pasada. Cuando la cantidad de nieve que ha sido retirada tanto de las carreteras como de las aceras excede el límite de capacidad de almacenamiento a lo largo de éstas, es necesario proceder con las operaciones de recogida de la misma, ya sea manualmente o, en caso de grandes cantidades de nieve, con máquinas rotatorias que expulsan dicha nieve al interior del camión.



3.2. GESTIÓN DE LOS PROBLEMAS DE ORGANIZACIÓN OPERACIONALES

Una vez ya ha sido decidido el procedimiento de coordinación más adecuado entre las principales operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria (el esparcimiento de productos químicos y abrasivos, la retirada de nieve, la carga de la misma en camiones y el transporte de ésta hasta los lugares de depósito), es necesario, resolver técnicamente una serie de problemas de organización con el propósito de que éstas operaciones principales sean desarrolladas de la forma más eficiente.

A continuación, se va a analizar cada uno de éstos problemas de organización con el propósito de comprender la dificultad de resolución de los mismos y la imposibilidad de resolver todos ellos a la vez debido al conflicto de intereses entre ellos.

3.2.1. NIVEL DE SERVICIO

Las fechas u horas límite para que las operaciones tanto de retirada como de recogida de la nieve sean realizadas, las cuales se basan normalmente en consideraciones tanto políticas como económicas, guían principalmente el proceso de asignación de uno u otro nivel de servicio a cada uno de los diferentes sectores en los cuales una determinada red viaria o ciudad es dividida. Con el propósito de que en el caso de grandes ciudades éstas sean limpiadas de nieve completamente sin sufrir ningún retraso, se realiza la limpieza de todos los sectores en los que éstas han sido divididas al mismo tiempo. Como se puede suponer, aquellos sectores a los que se les ha designado un determinado nivel de servicio deberían tener las mismas fechas y horas límite para ser limpiados, es decir, mantener una política equitativa entre todos ellos.

Los costes de las operaciones de retirada y recogida de la nieve en los diversos sectores descienden al aumentar las fechas y horas límite para que éstos sean limpiados, sin embargo, contra más rápidamente la nieve sea retirada los inconvenientes y los costes indirectos al público y negocios se reducirán. Es por ello, que antes de tomar una decisión en cuanto al nivel de servicio de los sectores se refiere, es necesario valorar si un incremento en las fechas y horas límite de limpieza, con su consecuente incremento de los inconvenientes al público y su también asociada reducción de costes vale realmente la pena.

Además de las características ya nombradas para decidir del nivel de servicio de los distintos sectores, otras condiciones sociales, medio ambientales y de equipamiento deben de ser también valoradas en éste proceso de decisión tal y como se indica en (Minsk, 1998).

3.2.2. LOCALIZACIÓN DE LOS ALMACENES DE VEHÍCULOS Y DE MATERIALES PARA LAS OPERACIONES DE ESPARCIMIENTO DE QUÍMICOS Y ABRASIVOS

Para poder llevar a cabo las operaciones de esparcimiento de químicos y abrasivos, es necesario disponer tanto de almacenes de vehículos como de materiales. El problema fundamental es conseguir una localización apropiada de todos ellos con el fin de que dichas operaciones se ejecuten de la forma más eficiente posible. Dicho problema puede ser interpretado como un problema de localización de redes con la restricción de que los almacenes tan solo pueden ser colocados en los nodos de la red.

Como ya se comentó en la introducción de ésta sección, con el objetivo de reducir entre otros los costes en el mantenimiento invernal de la red viaria, los vehículos, el equipamiento o las infraestructuras pueden ser compartidos entre las diferentes operaciones invernales o incluso con las no invernales. Es por éste motivo, que el problema de localización de los almacenes deba en muchas ocasiones que tener en cuenta no todas las operaciones de mantenimiento que se realizan a lo largo del año y no solo aquellas relacionadas con el



mantenimiento invernal.

Los almacenes de materiales, los cuales son necesarios para las operaciones de recarga de químicos y abrasivos, deben de situarse estratégicamente con el propósito de que los vehículos esparcidores puedan ser recargados rápidamente sin necesidad de que éstos deban volver al almacén principal de donde éstos partieron al principio del recorrido. Sin embargo, en algunas ocasiones, puede resultar conveniente que estos almacenes de materiales cumplan también la función de garaje de vehículos.

Dado que el propósito fundamental de los almacenes de material debe de ser tanto guardar como abastecer a los vehículos de productos químicos y abrasivos, el diseño de éstos edificios es generalmente muy amplio y simple con el objetivo de permitir de ésta manera que más vehículos sean recargados al mismo tiempo y que, obviamente, la cantidad de material almacenado también sea mayor. Normalmente, en éste tipo de almacenes se encuentran varios vehículos con pala frontal en la planta baja para facilitar la carga de los vehículos que llegan a la planta a recargar.

3.2.3. LOCALIZACIÓN DE LOS LUGARES DE DEPÓSITO DE LA NIEVE EXTRAÍDA

El problema de localización de los lugares de depósito de la nieve extraída se trata de un problema estratégico que plantea las bases para las operaciones tanto de recogida como de retirada y transporte de la nieve tal y como se detalla en (Leclerc, 1985).

Los lugares más comunes en los cuales dicho depósito puede tener lugar, son o bien lugares de la infraestructura urbana, como las alcantarillas, o bien lugares geográficos como parcelas vacantes. Es por ésta razón que éste problema puede ser analizado como si se tratara de un problema de localización de instalaciones en un espacio discreto. De entre los diferentes lugares en los que se puede realizar dicho depósito, muy a menudo, la opción más adecuada es el depósito en ríos o lagos a pesar de que, por ejemplo, la selección como lugar de depósito de lugares en los que la nieve puede ser fundida y procesada posteriormente en instalaciones depuradoras reporta mayores beneficios medio ambientales, ya que el costo es más elevado.

Otro factor a considerar en la localización de éstos lugares de depósito es que se tratan de instalaciones muy molestas y altamente dependientes del periodo del año, es decir, cuando las operaciones de depósito de la nieve tienen lugar, se da un enorme volumen de tráfico durante todo el día en las zonas adyacentes a dichas instalaciones por lo que los inconvenientes en los lugares residenciales cercanos son enormes.

3.2.4. DISEÑO DE LOS SECTORES DE OPERACIÓN

Otro problema fundamental en el mantenimiento invernal de la red viaria es dividir las ciudades o los conjuntos de redes viarias en diferentes sectores de operación. Éste problema es similar al problema estudiado por Bodin y Levy en (Bodin & Levy, 1991), donde se estudia detalladamente el problema de partición de grafos con arcos en el contexto del envío postal. Además, el diseño de sectores de operación también comparte varias características con los problemas de distribución de distritos para aplicaciones de ruteo de grafos como, por ejemplo, el diseño de las diversas regiones de servicio entre uno o más almacenes de vehículos cuando cada vehículo puede visitar varios clientes en un mismo tour, o el caso de la recogida de basuras. En comparación con otras aplicaciones de distribución de distritos como la distribución de distritos políticos, alineación de territorios de ventas, distribución de distritos para servicios de salud, el diseño de los distritos escolares, o la distribución de distritos para los servicios de emergencia, el problema de distribución de sectores de operación para el caso de ruteo de vehículos en el caso de distribuciones o recogidas de material, ha sido muy poco estudiado en bibliografía anterior.



Una de las principales dificultades al estudiar éste tipo de problemas es incorporar al método de resolución de éste tipo de problemas los aspectos relacionados a la eficiencia del ruteo de vehículos. Tal y como ocurre en otros problemas relacionados con las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria, es necesario establecer un balance adecuado entre la minimización de costes y la mejora de la funcionalidad del sistema. En éste caso específico del diseño de sectores, con el propósito de que cada uno de ellos sea limpiado por un solo equipo de trabajo en un determinado tiempo, es conveniente que éstos sectores sean suficientemente pequeños. Sin embargo, por otra parte, el número de éstos sectores debe ser lo más pequeño posible con el objetivo de minimizar los numerosos costes fijos que cada uno de éstos sectores lleva consigo, como los costes de equipamiento o de los equipos de trabajadores, para lo cual, los vehículos asociados como los quitanieves deben operar lo máximo posible y de ésta forma maximizar el tamaño de los sectores.

Otro problema estratégico que hay que tener en cuenta tanto en el diseño de los sectores de operación como en la localización de los lugares de depósito, es el decidir si éstos sectores deben ser limpiados íntegramente por los servicios de la propia ciudad, o si algunos de ellos deben ser limpiados por compañías privadas y, en el caso de la localización de los lugares de depósito, estudiar si resulta conveniente que éstos sean compartidos con otras ciudades y si es así, cuáles son las tasas que se deben cobrar. Sin embargo, éste problema no es detallado en el presente proyecto ya que se considera un problema mucho más específico de cada ciudad.

3.2.5. ASIGNACIÓN DE SECTORES A LOS LUGARES DE DEPÓSITO

El problema tratado en éste apartado consiste en asignar un conjunto de sectores de operación a un conjunto de lugares de depósito de la nieve minimizando la suma de los costes de transporte de la misma hasta éstos depósitos, y el coste de operación de éstos lugares de depósito, al mismo tiempo que se satisfacen tanto la capacidad anual de cada lugar de depósito, generalmente medido en m^3 de nieve al año, como la capacidad máxima de recepción de cada uno de ellos, la cual es medida normalmente en m^3 de nieve a la hora.

El primer modelo lineal para resolver el problema fue presentado en 1985 por Leclerc (Leclerc, 1985). En éste modelo, las restricciones debidas a la máxima capacidad anual de cada depósito son consideradas pero sin embargo no se considera la máxima capacidad horaria que cada uno de éstos tiene. A pesar de que el modelo desarrollado permite la asignación de varios sectores de operación a varios lugares de depósito, por razones operacionales del modelo de Leclerc, la asignación de cada sector debe de ser restringido a un solo lugar de depósito.

Posteriormente, en (Campbell & Langevin, 1995), Campbell and Langevin formularon otro modelo, el cual fue resuelto usando nuevos métodos heurísticos, que incluía tanto las restricciones anuales como las restricciones horarias de los lugares de depósito. Además, en éste modelo se añadía la restricción de que cada sector debe de ser asignado solamente a un solo lugar de depósito.

La asignación de los sectores a los lugares de depósito implican consecuencias a medio plazo, por ejemplo, la asignación de dichos lugares de depósito a éstos sectores se realiza cada temporada invernal pero, para poder tener en cuenta las posibles variaciones climáticas, en muchas ocasiones es necesario realizar ajustes mensuales durante la época invernal.

Debido a la enorme interdependencia entre el problema de asignación de los sectores a los lugares de depósito y el propio problema de diseño de dichos sectores, ya que el tamaño y la forma de éstos debería probablemente depender de la asignación del lugar de depósito, en muchas ocasiones, ambos problemas son estudiados separadamente pero, como es de imaginar, éste procedimiento produce sistemas muy por debajo del óptimo.



3.2.6. ORGANIZACIÓN DE LA FLOTA DE VEHÍCULOS Y EQUIPOS

Tanto en las operaciones de retirada y transporte de la nieve como en las de recogida, es fundamental una adecuada resolución de los problemas de selección de equipamiento, de selección de equipos y de la organización horaria de los mismos.

Una vez que los sectores de operación ya han sido definidos y diseñados, el tamaño y la composición del conjunto de vehículos y equipamiento deben de ser determinados teniendo en cuenta parámetros tan específicos como la configuración de aceras y carreteras, el uso del terreno, por ejemplo residencial o comercial y, sobre todo, la fecha límite de finalización de las operaciones en dicho sector. Una de las investigaciones más relevantes relacionadas con el problema estudiado es la llevada a cabo por Savas en 1973, (Savas, 1973) , en la cual, considerando además varios aspectos políticos, se definió el conjunto de materiales, vehículos y personas que debían ser adquiridos o contratados en la ciudad de Nueva York con el propósito de hacer frente a las operaciones de retirada de nieve.

En cuanto al problema de selección del equipamiento necesario para hacer frente a la operación de retirada de la nieve, el modelo introducido por Campbell y Langevin, (Campbell & Langevin, 1992) , en el cual los vehículos son asignados a diferentes sectores, muestra como el número y el tamaño de dichos vehículos depende de las distancias que éstos deben recorrer desde sus sectores de trabajo hasta los lugares de depósito, es decir, dicho modelo muestra como el problema de selección de equipamiento esta enormemente relacionado con el problema anteriormente estudiado de la asignación de los diferentes sectores a los distintos lugares de depósito, por lo cual, cualquier intento de resolver el mismo sin tener en cuenta éste problema, producirá peores resultados.

3.2.7. RUTEO DE LOS VEHÍCULOS

Los problemas de ruteo de vehículos se encuentran presentes en todas las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria, esparcimiento de productos químicos y abrasivos, retirada de nieve y carga y transporte de la misma hasta los lugares de depósito. En estos problemas, lógicamente, las piezas más importantes son los vehículos encargados de realizar dichas operaciones, como quitanieves, esparcidores o camiones. El hecho de que éste tipo de problemas tenga que hacer frente a dos tipos de restricciones muy fuertes, las restricciones de precedencia, como por ejemplo que unas calles deban ser limpiadas antes que otras, y las restricciones de tiempo, como pueden ser los límites máximos requeridos de tiempo de limpieza o las limitaciones de aparcamiento en ciudades, hacen que éste tipo de problemas sean considerados como los más complicados de afrontar en el planeamiento de las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria.

Éste tipo de problemas, están basados en el conocido problema del vendedor viajero (Traveling Salesman Problem), y, además, los ejemplos más comunes de aplicación real se sustentan en el problema del repartidor chino (Chinese Postman Problem). Por éstos motivos, los problemas de ruteo se consideran inmersos profundamente en la familia de problemas NP-duros, y, por ello, la gran mayoría de los algoritmos desarrollados se basan en la heurística.

Con el objetivo de repartir proporcionadamente la carga de trabajo entre los diferentes vehículos implicados en las operaciones de esparcimientos de sal y validando dichos resultados mediante experimentos de simulación, Cook y Alprin, (Cook & Alprin, 1976) , presentaron un método heurístico basado en la selección de la carretera más próxima para minimizar el tiempo que se tardaba en cubrir todas las calles de una determinada red viaria. Otro algoritmo a destacar en la solución de los problemas de ruteo es el desarrollado



por Eglese, (Eglese, 1994) , el cual permitía la existencia de múltiples depósitos, añadía el parámetro de la capacidad máxima de cada vehículo y consideraba diversas prioridades de limpieza de carreteras, con el objetivo final de minimizar la distancia que los camiones encargados de transportar abrasivos debían realizar. En 1984, Lemieux y Campagna, (Lemieux & Gampagna, 1984), implementaron un algoritmo basado en heurística que trazaba un circuito euleriano en un grafo dirigido teniendo en cuenta las relaciones de precedencia para el problema de retirada de nieve en entornos rurales. Otro ejemplo de algoritmo desarrollado para resolver ésta clase de problemas es el modelo presentado por Gilbert en 1990, en el cual se centró en el ruteo de las máquinas encargadas de soplar la nieve, modelando dicho problema como si fuera el problema del repartidor chino (Chinese Postman Problem) de una manera asimétrica y teniendo en cuenta parámetros como duración, relación de precedencia y restricciones de tiempo.

Como ya se comentó anteriormente, la gran mayoría de los problemas relacionados con las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria están relacionados con los problemas de ruteo de diversos arcos o ejes en un grafo. Sin embargo, otras dificultades aparecen a la hora de intentar resolver éstos problemas. Por ejemplo, cuando los camiones son cargados con nieve y deben de viajar desde la máquina asociada a cada uno de ellos encargadas de cargarles la nieve hasta el lugar de depósito de la misma y, posteriormente volver hasta donde dicha máquina se encuentre, el problema tiene la dificultad añadida de que se trata de encontrar el recorrido más corto entre el lugar de depósito y la máquina asociada pero estando ésta en movimiento. Además, otras dificultades a tener en cuenta en el proceso de solución de estos problemas son, por ejemplo las variaciones en el tráfico de las carreteras, o incluso temas de equidad o de sociedad, dado el elevado número de camiones que llegan a los lugares de depósito, los cuales pueden ocasionar enormes molestias.

En general, los problemas de ruteo relacionados con el transporte de la nieve a los lugares de depósito no han sido tan estudiados como los relacionados al esparcimiento, o la retirada de la misma, es decir, aquellos problemas de ruteo de diversos ejes o arcos de un grafo. Esto es debido a que en un gran número de lugares, una adecuada operación de esparcimiento de químicos y abrasivos con el objetivo de evitar el congelamiento seguida de una operación de retirada de la nieve puede hacer innecesaria la recogida y transporte de la misma hasta los lugares de depósito, sobre todo en aquellas situaciones en las que es posible depositar toda la nieve a lo largo de las carreteras sin impedir la circulación del tráfico y las condiciones climáticas no son muy desfavorables, tal y como Guterbock presento en (Guterbock, 1990) .



4. CONCLUSIONES

4.1. APORTACIONES DEL TRABAJO REALIZADO

Con la conclusión de este proyecto, y la consiguiente obtención de un programa que permita establecer las rutas más convenientes a seguir por los vehículos encargados de realizar las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria, el cual ha sido desarrollado íntegramente por mí, se consigue facilitar la labor de instituciones públicas y privadas que deban planificar dicho conjunto de operaciones.

El desarrollo del propio programa, así como una explicación de los resultados obtenidos en cada una de las modificaciones del mismo, se encuentran en el apartado '6.3. Desarrollo del algoritmo'. Si bien dicho desarrollo había sido colocado en un primer lugar entre el apartado '3. Puntos clave en el mantenimiento invernal de la red viaria' de la memoria y el presente apartado, el apartado '4. Conclusiones', se ha tomado la decisión de mover el mismo a los anexos del proyecto, en el apartado '6. Anexos', debido a la extensión del mismo. Previo al mismo, se ha colocado el apartado '6.2. Algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas (ACO)', en el cual se ofrece una introducción a dichos algoritmos, los cuales son los cimientos del programa desarrollado. Finalmente, el programa definitivo ha sido añadido al final de los anexos, en el apartado '6.4. Programa definitivo', a fin de que éste pueda ser consultado en detalle si se considerara necesario.

Dicho proyecto aporta un método simple y efectivo para proveer de ahorros económicos considerables a aquellos organismos que decidan usar dicha herramienta. Estos ahorros vendrán dados por tanto la posibilidad de reducir la flota de vehículos utilizados como por el hecho de reducir el tiempo que estos necesitan para llevar a cabo sus operaciones de mantenimiento. Además, se conseguirán reducir enormemente los problemas ocasionados por las adversas condiciones climáticas invernales que tienen lugar en dichos lugares, como pueden ser el suspenso de clases, cierres temporales de negocios, o incluso la imposibilidad de acceder a servicios mínimos básicos debido al impedimento de usar la red viaria.

Las diferencias principales que dicho proyecto aporta con respecto a otros estudios realizados acerca del tema es, como primer aspecto, la posibilidad de que este tenga una aplicación real y efectiva sin la necesidad de realizar modificaciones considerables en el programa desarrollado. Esto se debe principalmente a que el programa en cuestión se trata de un programa genérico, lo cual hace que este pueda ser aplicado sobre diversos conjuntos viarios con tan solo realizar un grafo que simule dicho conjunto viario. Por otra parte, el programa introduce una metodología totalmente innovadora fundamentada en los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas, los cuales son explicados en los anexos en el apartado '6.2. Algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas (ACO)', para resolver problemas teóricos como el conocido 'Chinese Postman Problem' o el 'Rural Postman Problem' y aplicarlos a problemas reales como las operaciones de mantenimiento invernal.

4.2. CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

A la vista de los resultados finales obtenidos, se puede afirmar que los objetivos planteados en la introducción de dicho proyecto han sido satisfactoriamente cumplidos.

En un primer lugar, se ha realizado un estudio detallado en el apartado '3. Puntos clave en el mantenimiento invernal de la red viaria' de los factores más influyentes que deben tenerse bajo consideración al realizar la planificación de las operaciones de mantenimiento invernal de la red viaria. Con dicho estudio, se ha conseguido no solo poner en relevancia cada una de las características más importantes de estas operaciones



sino que además, se ha conseguido introducir al lector la importancia real que dichas operaciones conllevan anualmente además de facilitar el camino para futuras investigaciones.

Por otra parte, y como objetivo más notorio, el diseño de un programa que permitiera diseñar la ruta más conveniente de los vehículos implicados en la realización de las operaciones de mantenimiento invernal ha conseguido obtener unos resultados más que satisfactorios, tal y como se puede observar en las conclusiones obtenidas de la última versión del programa desarrollado, el cual es explicado en el apartado '6.3.3. Construcción del algoritmo'. Por ello, si bien es cierto que dichos resultados son los relativos a la aplicación del programa al campus de la universidad de Rhode Island, el hecho de que el programa sea genérico y fácilmente extrapolable a otros conjuntos viarios, hace que estos resultados sean realmente satisfactorios a nivel general.

4.3. POSIBILIDADES DE AMPLIACION Y MEJORA

Dada la enorme complejidad del problema a tratar, debido al gran número de restricciones que el ruteo de los vehículos presenta, ha sido necesaria una descomposición del mismo en problemas de menor entidad con el propósito de que estos pudieran ser abordados secuencialmente de una manera satisfactoria. Por este motivo, si bien el programa final desarrollado ya aborda gran cantidad de restricciones, como el hecho de tener que visitar obligatoriamente tan solo un subconjunto de calles, o tener que devolver los vehículos al depósito una vez finalizado el trabajo, todavía existen varias restricciones que no han sido aplicadas en el programa final.

En primer lugar, en caso de que se deseara ampliar el programa realizado, sería conveniente realizar grafos direccionales en lugar de no direccionales como hasta ahora. Con esta modificación, se conseguiría por ejemplo establecer un patrón de la red viaria mucho más similar a la realidad, ya que de esta forma se podrían introducir calles con dos sentidos de circulación, calles con diferentes números de carriles por sentido, e incluso restricciones direccionales del tráfico. Además, dicha modificación sería muy útil a la hora de solucionar el problema diferenciando entre las diferentes operaciones principales de mantenimiento invernal de la red viaria. Esto se debe a que, tal y como se comentó en el apartado '3.1. Principales operaciones en el mantenimiento invernal de la red viaria', si bien en las operaciones de esparcimiento de químicos y abrasivos, el vehículo encargado de realizar dichas funciones puede ajustar el esparcidor para que con una sola pasada en una vía se consiga repartir el producto en todo lo ancho de la misma, en las operaciones de recogida de nieve con los quitanieves, estos necesitan, en el caso de vías de dos carriles, dos pasadas para completar la recogida en dicha vía.

Como otro punto a considerar en la posible ampliación del programa, es el hecho de dotar al mismo con una información más relevante en cuanto a los resultados se refiere. En el programa desarrollado, los resultados muestran el número de tramos recorridos que han sido necesarios para completar las operaciones de mantenimiento en un determinado conjunto viario y volver al depósito. Esto se ha realizado de dicha manera ya que, dada la entidad física del grafo a tratar, el campus de la universidad de Rhode Island, las longitudes de dichos tramos se han considerado más o menos similares y, por tanto, la información del número de tramos necesitados proporciona una información más que relevante. Sin embargo, en las posibles ampliaciones del mismo, sería conveniente el añadir longitudes reales a dichos tramos y, a su vez, estimar tiempos necesarios de limpieza de los mismos dependiendo de factores como inclinación, cantidad de nieve, tiempo que esta ha estado depositada o el hecho de que recorrer calles ya operadas cuesta menos tiempo que calles que todavía no lo han sido. Por ello, los resultados finales proporcionarían valores bastante más valiosos como, por ejemplo, el tiempo que se estima de limpieza para un conjunto viario en un momento determinado.

Si bien este proyecto ha sido desarrollado hasta este punto íntegramente por mí, este ha estado en todo momento guiado por el personal del departamento de 'Mechanical, Industrial and Systems Engineering' de la universidad de Rhode Island, y, en especial, por el Dr. Manbir Sodhi, el cual es el director del proyecto. La



decisión de realizar el presente proyecto ha venido marcada no solo por el interés de la universidad de Rhode Island en resolver dicho problema, sino también por el interés comunicado al Dr. Manbir Sodhi por parte del 'Department of Transportation' del estado de Rhode Island para solucionar dicho problema en sus principales núcleos urbanos como Providence, capital del estado. Es por ello, que el presente proyecto sienta las bases para próximas ampliaciones del mismo a fin de conseguir un programa que sea aplicable a corto plazo a las instituciones gubernamentales del estado que lo requieran. Por otra parte, es necesario nombrar, que, en caso de una aplicación a nivel estatal del problema, sería necesario añadir una nueva restricción con el propósito de que más de un vehículo al mismo tiempo pudiera estar desarrollando dichas labores y además, sería recomendable conseguir automatizar en la medida de lo posible el proceso de creación de los grafos a fin de acelerar la aplicación del programa.

4.4. INCIDENCIAS Y PROBLEMAS ENCONTRADOS

En primer lugar, el mayor inconveniente encontrado al iniciar el proyecto fue conseguir definir apropiadamente los objetivos del mismo ya que, la única información de partida era la definición del problema que el 'Department of Transportation' y la propia universidad de Rhode Island habían dado al Dr. Manbir Sodhi. Por ese motivo, durante un largo periodo de tiempo se mantuvieron entrevistas con los encargados de dichas operaciones en ambas instituciones con el propósito de conseguir definir lo más precisamente posible con ellos los objetivos que se intentaban conseguir.

Una vez se llegó a la conclusión de que el método más apropiado para conseguir producir unos ahorros significativos en cuanto a las operaciones de mantenimiento invernal se refiere, sería el conseguir mejorar las rutas que los vehículos encargados de realizarlas deben seguir, se consideró como medida apropiada el realizar un programa que solventara dicho problema. Sin embargo, el mayor problema surgió en ese momento, ya que no se disponía de ninguna información que pudiera ser de utilidad a la hora de guiar los pasos a seguir en la construcción de dicho programa. Tras un largo periodo investigando acerca de problemas similares que habían sido resueltos y su mecanismo de resolución, se llegó a concretar que un buen método para implementar el programa sería el utilizar los conceptos usados por los algoritmos de inteligencia colectiva, en concreto, los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas. Para conseguir una información más precisa del tema, se procedió a realizar una lectura intensiva del procedimiento de resolución que estos seguían, con los consecuentes problemas de comprensión en muchos momentos, por lo cual, fue necesaria la lectura adicional de bibliografía que proporcionara los conocimientos necesarios para la comprensión de dichos algoritmos.

Una vez ya establecido el procedimiento de trabajo, el siguiente problema surgió para decidir que lenguaje de programación debía ser usado y consecuentemente estudiado con el propósito de poder aplicarlo al programa en cuestión. El proceso de aprendizaje de dicho lenguaje de programación, Python, se llevó a cabo durante toda la estancia en la universidad de Rhode Island, ya que, a medida que el programa iba avanzando en complejidad, era necesario tener un mayor dominio del mismo.

Otra complicación a destacar, fue la dificultad de analizar los resultados que los programas iban ofreciendo. Esto se debió básicamente a que, en general, la carga computacional de los programas era enorme y, por tanto, el número de datos que el programa ofrecía al acabar cada ejecución superaba sencillamente los 10000 parámetros y además, el tiempo que llevaba el obtener dichos datos en ocasiones superaba las 72 horas. Esto ocasionaba que en muchas ocasiones, cuando los programas ejecutados no ofrecían los resultados esperados y, por tanto, debían de volver a ser ejecutados, se necesitara de nuevo una gran implicación de trabajo y tiempo.

En último lugar, destacar la problemática de sintetizar dicho proyecto de una manera concisa, auto contenida, y que a su vez cubriera exhaustivamente el contenido del trabajo realizado ya que, al haber sido realizado



durante una extensa estancia de alrededor de 9 meses en la Universidad de Rhode Island bajo la dirección del Dr. Manbir Sodhi, exigente director de proyecto, la extensión del mismo superaba con creces las recomendaciones de presentación dadas por la Universidad de Zaragoza. Además, la dificultad y complejidad del mismo ha hecho que fuera necesario añadir diversas explicaciones introductorias.

4.5. OPINIÓN PERSONAL Y EXPERIENCIA ADQUIRIDA

La ejecución del presente proyecto, me ha supuesto una experiencia inolvidable tanto a nivel académico como personal. A pesar del hecho de encontrarme en un país con unas diferencias culturales tan distintas al mío y, por supuesto, la dificultad añadida de necesitar controlar un idioma distinto al materno a un nivel académico elevado, hicieron que, sobretodo, mis primeros meses de trabajo fueran mucho más duros que si hubiera desarrollado el mismo proyecto en la propia universidad española. Sin embargo, creo profundamente que esta experiencia me ha dotado de una capacidad de superación personal que, sin duda alguna, marcará mi comportamiento futuro a nivel personal, académico y profesional.

En cuanto a los aspectos académicos se refiere, la realización de este proyecto me ha permitido poner en práctica los conocimientos adquiridos durante mis años cursando ingeniería industrial en la universidad de Zaragoza, en especial, los referentes al campo de Organización Industrial, en el cual he estado inmerso durante los últimos años de estudio de la carrera. Además, he necesitado adquirir conceptos que en un principio eran totalmente desconocidos por mí, ya que, al realizarse el proyecto en un país como Estados Unidos, en el cual, por ejemplo, los programas usados, lenguajes de programación y, sobre todo, las metodologías de trabajo e investigación utilizadas son tan diferentes a las usadas en España, ha hecho que haya necesitado de un esfuerzo añadido para llevar a cabo el proyecto, sin embargo, considero que estos conocimientos tienen un enorme valor en mi formación académica.

A nivel personal, el hecho de haber estado inmerso en una cultura como la estadounidense durante un largo periodo, alrededor de 9 meses, me ha permitido mejorar mi nivel de inglés enormemente al tener que tratar diariamente con profesores, compañeros de trabajo y, sobre todo, mis compañeros de residencia, los cuales, tras todo este tiempo compartido, han pasado a ser mucho más que simples compañeros. Además, el hecho de convivir diariamente con personas de diferentes lugares del mundo, con sus respectivas culturas y diferencias sociales, me ha dado una perspectiva global del mundo que, sin duda, hubiera sido imposible sin esta experiencia.



5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Boldin, L., & Levy, L. (1991). The arc partitioning problem. *European Journal of Operational Research*, 53, 393-401.
- [2] Campbell, J. F., & Langevin, A. (1995). The snow disposal assignment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 46, 919-929.
- [3] Campbell, J., & Langevin, A. (1992). *Models for urban snow removal operations*.
- [4] Cook, T., & Alprin, B. (1976). Snow and Ice Removal in an Urban Environment. *Management Science*, 23(3), 227-234.
- [5] Deneubourg, J. L., Aron, S., Goss, S., & Pasteels, J. M. (1989). Self-organized shortcuts in the argentine ant. *Naturwissenschaften*(76), 579-581.
- [6] Deneubourg, J. L., Aron, S., Goss, S., & Pasteels, J. M. (1990). The selforganizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, 3-159.
- [7] Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Italie: Politecnico di Milano.
- [8] Dorigo, M., & Stützle, T. (2002). A short convergence proof for a class of ACO algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*(6), 358-365.
- [9] Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- [10] Eglese, R. (1994). Routing winter gritting vehicles. *Journal Discrete Applied Mathematics*, 48(3).
- [11] Guterbock, T. (1990). The Effect of Snow on Urban Density Patterns in the United States. *Environment and Behavior*, 22(3), 358-386.
- [12] Gutjahr, W. J. (2000). A graph-based ant system and its convergence. *Future Generation Computer Systems*(16), 873-888.
- [13] Gutjahr, W. J. (2002). ACO algorithms with guaranteed convergence to the optimal solution. *Information Processing Letters*(82), 145-153.
- [14] Gutjahr, W. J. (2006). On the finite-time dynamics of ant colony optimizations. *Methodology and Computing in Applied Probability*(8), 105-133.
- [15] Leclerc, G. (1985). Least-cost allocation of snowzones to elimination sites: formulation and post-optimal analysis. *Civil Engineering Systems*, 2, 217-222.
- [16] Lemieux, P., & Gampagna, L. (1984). The snow ploughing problem solved by a graph theory algorithm. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 1(6), 337-341.
- [17] Minsk, L. D. (1998). *Snow and ice control manual for transportation facilities*. McGraw-Hill.
- [18] National Research Council (U.S.). (1995). Winter maintenance technology and practices: learning from abroad. *Transportation Research Board*.
- [19] Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. (2006). A survey of models and algorithms for winter road



- maintenance. Part I. System design for spreading and plowing. *Computers & Operations Research* 33, 209–238.
- [20] Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. (2006). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part II. System design for snow disposal. *Computers & Operations Research* 33, 239–262.
- [21] Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. (2007). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part III. Vehicle routing and depot location for spreading. *Computers & Operations Research* 34, 211–257.
- [22] Perrier, N., Langevin, A., & Campbell, J. (2007). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV. Vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal. *Computers & Operations Research* 34, 258–294.
- [23] Savas, E. (1973). The Political Properties of Crystalline H₂O: Planning for Snow Emergencies in New York. *Management Science*, 20(2), 137–145.